УДК 661.879.621.039.54

МАТЕМАТИЧЕСКАЯ МОДЕЛЬ ПРОЦЕССА ТЕРМИЧЕСКОГО РАЗЛОЖЕНИЯ В БАРАБАННОЙ ВРАЩАЮЩЕЙСЯ ПЕЧИ

В.П. Пищулин, В.Н. Брендаков

Северский государственный технологический институт
E-mail: bvn@ssti.ru

Рассмотрены вопросы, связанные с созданием математической модели процесса термического разложения полиуранатов аммония. Путем сделанных допущений получена система уравнений, описывающая замкнутый цикл основных процессов, происходящих в барабанной вращающейся печи. Представлен алгоритм расчета температуры и степени термического разложения полиуранатов аммония, который позволяет проводить оптимизацию параметров и режимов работы барабанной вращающейся печи на основе методов математического моделирования.

Одним из основных промышленных методов производства оксидов урана является метод химической денитрации уранилнитрата. Поэтому исследование процесса термического разложения полиуранатов аммония имеет большое практическое значение. Одним из ключевых конструктивных элементов такой технологии является барабанная вращающаяся печь. Термическая диссоциация полиуранатов аммония является весьма сложным процессом, и вследствие этого, несмотря на многочисленные данные о таком процессе, до сих пор не существует общепринятых закономерностей, описывающих его.

Во-первых, различные данные имеют противоречивый характер, и, во-вторых, реальный эксперимент связан с большой стоимостью и высокой сложностью его выполнения. Исходя из этого, становится оправданным использование методов математического моделирования, достоверно описывающих реальные процессы, происходящие в барабанной вращающейся печи. Создаваемые модели могут быть использованы для проведения численных экспериментов, позволяющих решить задачи по оптимизации режимно-геометрических параметров самого устройства и выявлять факторы, оказывающие существенное влияние на процесс прокаливания полиуранатов аммония.

Ввиду большой сложности описания математически точно всех процессов, протекающих в бара-

банной печи, невозможно получить полный количественный расчет. Наибольшая трудность при создании математической модели состоит в том, что бы правильно выбрать допущения, позволяющие, с одной стороны, получить замкнутую систему уравнений, описывающих работу аппарата, а с другой стороны – построенная модель должна отражать основные физико-химические процессы, протекающие в печи.

Данная статья посвящена описанию первого варианта созданной математической модели барабанной вращающейся печи. Постановка задачи заключается в том, чтобы выбрать обоснованные допущения, которые не искажают основное содержание реального процесса, и в то же время позволяют записать в виде математических соотношений ключевые физико-химические процессы, реализуемые в печи.

При построении модели за основу был выбран аппарат, работающий на Сибирском химическом комбинате. Печь представляет собой цилиндрическую ёмкость диаметром D=0,6 м и длиной L=8,8 м, расположенную под углом наклона два градуса к горизонту, и вращающуюся с постоянной скоростью 3,33 об/мин. Степень заполнения прокалочной печи исходным продуктом составляет 3,0...3,5 %. Время нахождения продукта в барабане составляет порядка 20 мин. Там при температуре 450...650 °С происходит необратимая эндотермическая реакция термического разложения тетраураната аммония:

$$9(NH_4)_2U_4O_{13} \rightarrow 12\,U_3O_8 + 10\,NH_3 + 21\,H_2O + 4\,N_2. \quad (1)$$

В прокалочную печь подается предварительно нагретый азот, расход которого составляет от 6 до 20 м^3/ч. При проведении процесса термического разложения в атмосфере азота возрастает содержание урана в конечном продукте по сравнению с проведением того же процесса при продувке барабанной печи воздухом. Проведение процесса в инертной среде способствует уменьшению гранул конечного продукта, снижению рабочей температуры на 50...150 °С, повышает химическую активность оксида урана, ускоряет последующую операцию фторирования, повышает степень и скорость термического разложения и снижает энергетические затраты на 20...30 % [1].

Учитывая малый размер частиц исходного продукта (порядка 150...200 мкм), а также большой свободный объем в рабочей зоне прокалочной печи, можно сделать следующие допущения:

- реакция протекает только по ур. (1);
- физико-химические свойства материала не зависят от температуры;
- подвод тепла от стенки печи к слою материала осуществляется только теплопроводностью;
- время пребывания материала в аппарате не зависит от производительности;
- температура T_w нагревателей среды по всей длине печи остается постоянной;
- температура T слоя материала не имеет поперечного градиента.

Таким образом, задача создания математической модели физико-химических процессов, протекающих в прокалочной печи при термическом разложении дисперсного порошка полиураната аммония, состоит в том, что бы описать движение однородной сыпучей среды в рабочей зоне аппарата с учетом необратимой гетерогенной эндотермической реакции и процессов теплопереноса. В первом приближении можно рассмотреть одномерное движение слоя материала с постоянной скоростью.

Для описания распределения температуры вдоль аппарата используется уравнение конвективного теплообмена с учетом дополнительных источников теплоты [2]:

$$c_p\,\rho\left(\frac{\partial T}{\partial \tau} + u\,\frac{\partial T}{\partial x}\right) = \frac{\partial}{\partial x}\left(\lambda\,\frac{\partial T}{\partial x}\right) + q_1 - q_2\,, \qquad (2)$$

где $q_1=C_1(T_w-T_i)$ – теплота за счет нагрева печи, $q_2=C_2\Delta H\Delta\alpha$ – теплота, поглощаемая за счет реакции, $\Delta\alpha=\alpha_i-\alpha_{i-1}$ – изменение степени превращения вдоль аппарата.

Для оценки степени превращения воспользуемся эмпирической зависимостью, полученной в результате экспериментальных исследований на промышленной установке в условиях реального технологического процесса:

$$\alpha_i = 1-(1-\alpha_{i-1})\,\exp\left(-5\cdot10^{14}\cdot\exp\left(-\frac{26700}{T_{i-1}}\right)\right), \qquad (3)$$

где c_p – теплоемкость материала, 290 Дж/кг·К; ρ – насыпная плотность материала, 1850 кг/м^3; u – скорость движения материала, 0,44 м/с; λ – теплопроводность слоя материала, 30 Дж/м·К·мин; C_1 – константа модели, 0,105; T_w – температура поверхности прокалочной печи, 1020 К; C_2 – константа модели, 0,0175; ΔH – энтальпия реакции (1), 5,9·10^5 Дж/кг.

Граничные условия на входе в печь для температуры полиураната аммония выбирались 600 К, степень превращения – равна нулю, на выходе – равенство нулю производной от температуры по координате.

Таким образом, ур. (2, 3) совместно с граничными и начальными условиями представляют собой математическую модель процесса термического разложения в виде замкнутой системы, достаточной для определения характера изменения температуры и степени превращения вдоль прокалочной печи.

Созданная математическая модель решалась численно с использованием метода конечных разностей. Разностный аналог дифференциального уравнения записывался в виде чисто неявной схемы, т.к. она является, безусловно, устойчивой. Совместное решение этой системы находилось методом установления по времени с использованием алгоритма прогонки. На каждом шаге итерационного процесса вычислялось распределение температуры, и затем на основании ее находилась степень превращения.

Для оценки степени достоверности созданной модели реальному процессу, происходящему в барабанной вращающейся печи, был проведен тестовый расчет по экспериментальным данным из работ Сибирского химического комбината и Северского государственного технологического института. Результаты сравнения расчета, сплошная линия, и экспериментальных данных показаны на рис. 1, 2.

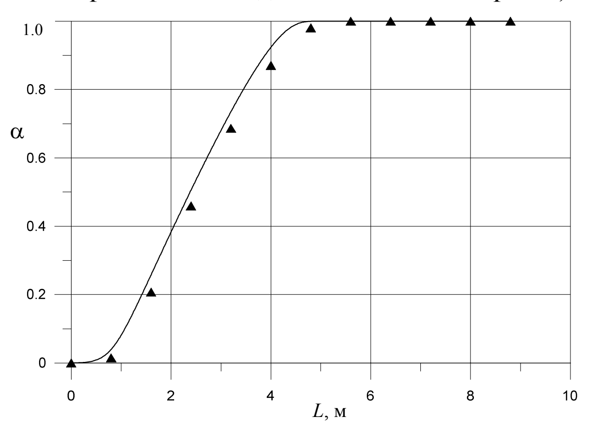


Рис. 1. Распределение степени термического разложения полиуранатов аммония вдоль прокалочной печи

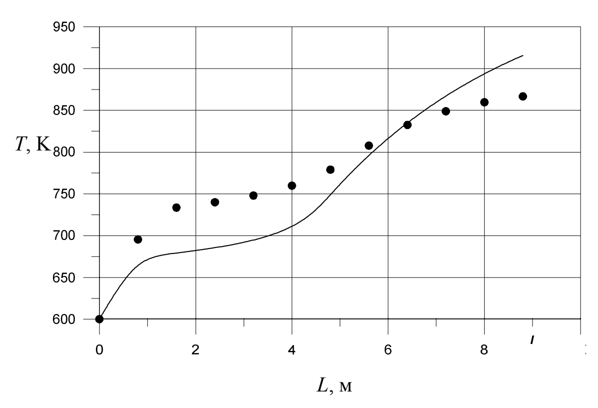


Рис. 2 Распределение температуры слоя продукта вдоль прокалочной печи

Хорошее совпадение позволяет сделать вывод о возможности использования данной математической модели для проведения расчетов по оптимизации параметров и режимов работы барабанной вращающейся печи. На рис. 3, 4 представлены результаты численного моделирования работы прокалочной печи при различных режимах прогрева вдоль аппарата. Во всех случаях температура печи на входе исходного полиураната аммония принималась 1200 K. Первая кривая соответствует режиму нагрева, когда температура обогрева линейно падает до значения на выходе конечного продукта 1000 K. Вторая кривая отвечает режиму с постоянной температурой обогрева печи 1200 K. И, наконец, третья кривая получена при режиме прогрева с линейным увеличением температуры вдоль печи до значения на выходе конечного продукта 1400 K. Как видно из рисунков, не смотря на явное различие в распределении температуры слоя продукта вдоль печи, степень превращения практически не изменилась. Это связано с тем, что основной процесс термического разложения полиураната аммония происходит в первой трети печи, когда четко заметна полочка на профиле температуры слоя материала. Отсюда следует, что увеличение температуры ведет только к неоправданным затратам электрической энергии на обогрев печи.

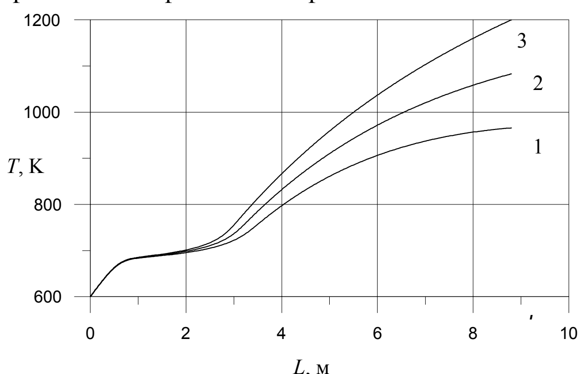


Рис. 3. Распределение температуры слоя продукта при разных режимах прогрева печи

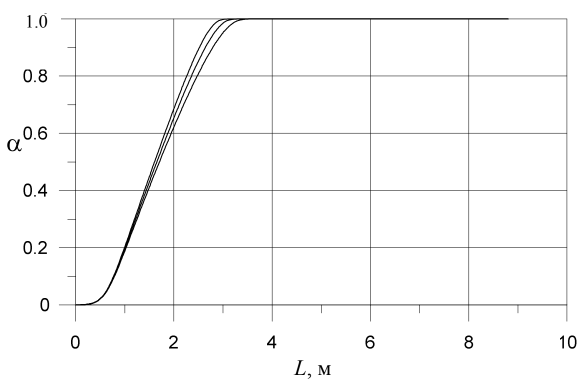


Рис. 4. Распределение степени превращения при разных режимах прогрева печи

На рис. 5 показана зависимость точки в аппарате, где степень термического разложения полиуранатов аммония становится равной единице, в зависимости от температуры стенки печи.

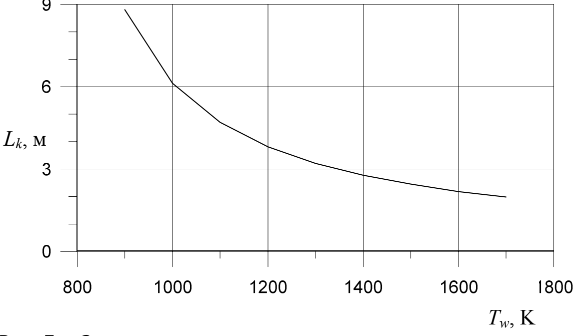


Рис. 5. Зависимость точки окончания процесса термического разложения от температуры стенки печи

На рис. 6 представлено распределение температуры слоя продукта вдоль аппарата для разных интенсивностей движения сыпучей среды. Базовому значению массового расхода исходного продукта соответствует кривая 2. Кривая 1 получена в ре-

зультате уменьшения расхода в два раза. Кривые 3–5 показывают изменение температуры в случае увеличения массового расхода в 2, 3 и 4 раза соответственно. На рис. 7 изображено изменение степени термического разложения вдоль аппарата при аналогичных режимах работы печи. Увеличение массового расхода приводит к изменению степени прогрева материала, особенно во второй половине печи. Причем явно заметна нелинейность между производительностью и степенью термического разложения. Расчеты показывают, что увеличение производительности прокалочной печи в 2, 3 и даже в 4 раза, при данной длине аппарата, обеспечивает полноту термического разложения полиураната аммония. Изменение температурного режима печи не приводит к столь существенному увеличению интенсификации процесса прокаливания.

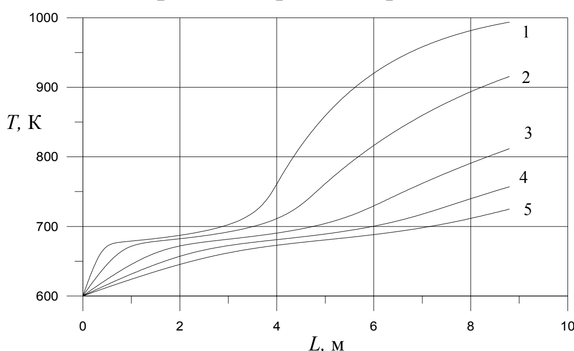


Рис. 6. Распределение температуры слоя при разном массовом расходе

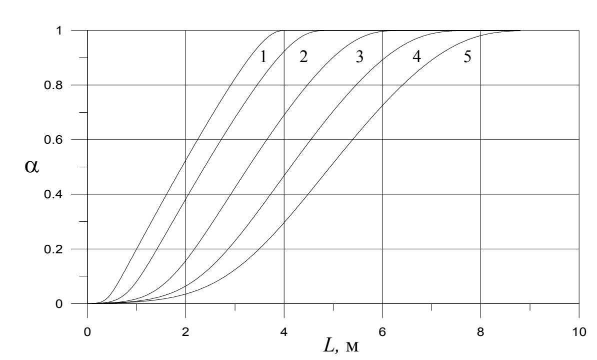


Рис. 7. Распределение степени термического разложения полиураната аммония при разном массовом расходе исходного вещества

Выводы

1. Проведено исследование процесса термического разложения полиураната аммония в промышленных условиях.
2. На основании лабораторных и промышленных исследований построена математическая модель термического разложения полиураната аммония.
3. Проведен численный анализ адекватности модели экспериментальным данным и получено хорошее согласование.
4. Созданная модель показала возможность повышения производительности барабанной вращающейся печи без снижения качества конечного продукта.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Zhiganov A., Lobas O., Pishchulin V., Mironov V. Thermal decomposition of $(NH_4)_2U_4O_{13}$ // Vth Korea-Russia Intern. Symp. on Science and Technology Proceeding (KORUS 2001). June 26–July 3. 2001. – Tomsk: Tomsk Polytechnic University, 2001. – V. 2. – P. 165–167.
2. Самарский А.А., Вабищевич П.Н. Вычислительная теплопередача. – М.: Едиториал УРСС, 2003. – 784 с.

УДК 536.25